

**КИНЕМАТИКА ПОРООБРАЗОВАНИЯ В СВАРНОМ ШВЕ****Серенко В. А., Лаврова Е. В., Иванов В. П.**

Для предупреждения пористости в швах и повышения механических свойств сварных соединений разработана кинематическая модель порообразования при сварке (наплавке), учитывающая гидродинамику жидкого металла в сварочной ванне, поведение пузырьков газа в условиях нестационарной температуры расплава. Получены дифференциальные уравнения, позволяющие определить вероятность появления пор в шве. Рассмотрены вопросы влияния неравномерности значений температуры в различных участках сварочной ванны на кинетику порообразования.

Для попередження пористості в швах і підвищення механічних властивостей зварних з'єднань розроблена кінематична модель пороутворення при зварюванні (наплавленні), що враховує гідродинаміку рідкого металу в зварювальній ванні, поведінку бульбашок газу в умовах нестационарної температури розплаву. Отримано диференціальні рівняння, що дозволяють визначити ймовірність появи пор в шві. Розглянуто питання впливу нерівномірності значень температури в різних ділянках зварювальної ванни на кінетику пороутворення.

To prevent porosity in welds, and improve the mechanical properties of welded joints developed a kinematic model of pore formation during welding (surfacing), taking into account the hydrodynamics of liquid metal in the weld pool and the behavior of gas bubbles in conditions of a non-stationary temperature of the melt. Differential equations to determine the probability of occurrence of pores in the seam. The questions of the impact of non-uniformity of temperature in different parts of the weld pool on the kinetics of pore formation.

Серенко В. А.

канд. техн. наук, доц. ГВУЗ ПГТУ

Лаврова Е. В.

канд. техн. наук, ст. преп. ГВУЗ ПГТУ  
[levlavr2003@mail.ru](mailto:levlavr2003@mail.ru)

Иванов В. П.

канд. техн. наук, доц. ГВУЗ ПГТУ

ГВУЗ ПГТУ – ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

УДК 621.791.75

Серенко В. А., Лаврова Е. В., Иванов В. П.

## КИНЕМАТИКА ПОРООБРАЗОВАНИЯ В СВАРНОМ ШВЕ

Пористость является основным дефектом при сварке (наплавке), в частности, цветных металлов и их сплавов, таких как алюминий, титан и др.

Большинство исследователей [1–5] связывают появление пор в шве в связи с выделением водорода из металла из-за понижения его растворимости при изменении температуры.

Однако после зарождения пузырьков газа в расплаве или попадания их в ванну с каплями плавящегося электрода, кинетика их роста, направления и скорость перемещения в жидком металле сварочной ванны, вероятность всплытия или застревания в кристаллизующей части ванны связаны, в конечном итоге, с физико-механическими процессами, протекающими в ванне.

Целью настоящей работы является математическое моделирование движения газовых пузырьков в сварочной ванне применительно к сварке или наплавке алюминия и его сплавов.

Примем, как и в [6, 7], что стенка кратера передней части ванны является частью шарового сегмента радиусом  $R_0$ , шириной провара  $B$  и глубиной провара  $h$  (рис.1), а изотермическая поверхность кристаллизации (задняя часть ванны) эллипсоидом с полуосями  $l_{xв}$ ,  $B/2$ ,  $H$  [8].

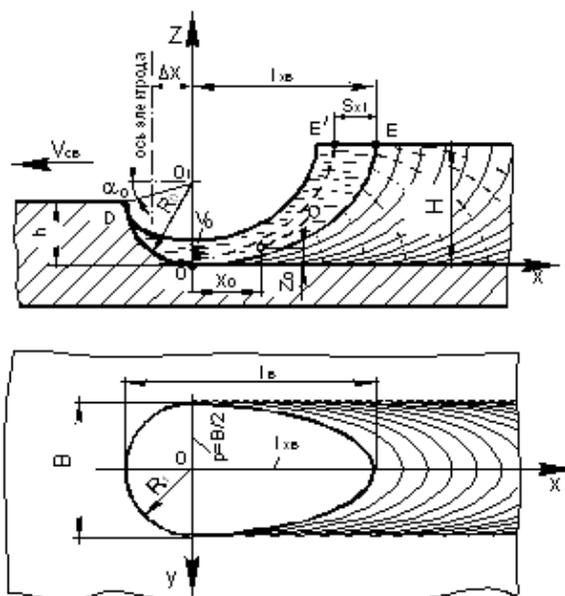


Рис. 1. Параметры сварочной ванны

Предположим, что одиночный газовый пузырек радиусом  $r_0$  находится в жидком металле ванны с начальными координатами  $x_0$ ,  $z_0$  (в диаметральной плоскости ванны). Дальнейшее поведение пузырька будет определяться действием выталкивающей (архимедовой) силы и равнодействующей сил поверхностного натяжения в неоднородно нагретой жидкости. Кроме того, пузырек будет перемещаться вместе с движением металла сварочной ванны, характер которого зависит от формы и размеров ванны, места расположения пузырька и др. факторов.

Абсолютная скорость перемещения пузырька в ванне (рис.2,а) будет равна геометрической сумме переносной скорости  $\vec{V}_{жс}$ , скорости всплытия  $\vec{V}_в$  и градиентной скорости  $\vec{V}_T$  в сторону увеличения температуры. Скорость всплытия газового пузырька в жидком металле определяется, прежде всего, числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{r \cdot V_в}{\nu}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус газового пузырька, м;  $\nu = \frac{\mu}{\rho_{жс}}$  – кинематическая вязкость жидкости,

зависящая от рода жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости, г/м<sup>3</sup>.

Для пузырьков радиусом  $r \leq 0,75$  мм ( $Re \leq 2$ ) скорость всплытия равна [7, 8]:

$$V_в = \frac{2}{9} \frac{g(\rho_{жс} - \rho_г)}{\mu} r^2, \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_г$  – плотность газа пузырька, г/м<sup>3</sup>.

При радиусе пузырьков  $r > 0,75$  мм ( $Re > 2$ ) скорость их всплытия может быть определена по зависимости

$$V_в = \left[ \frac{g(\rho_{жс} - \rho_г) \cdot r}{\rho_{жс} + \rho_г} + \frac{\sigma}{r(\rho_{жс} + \rho_г)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкого металла, Н/м.

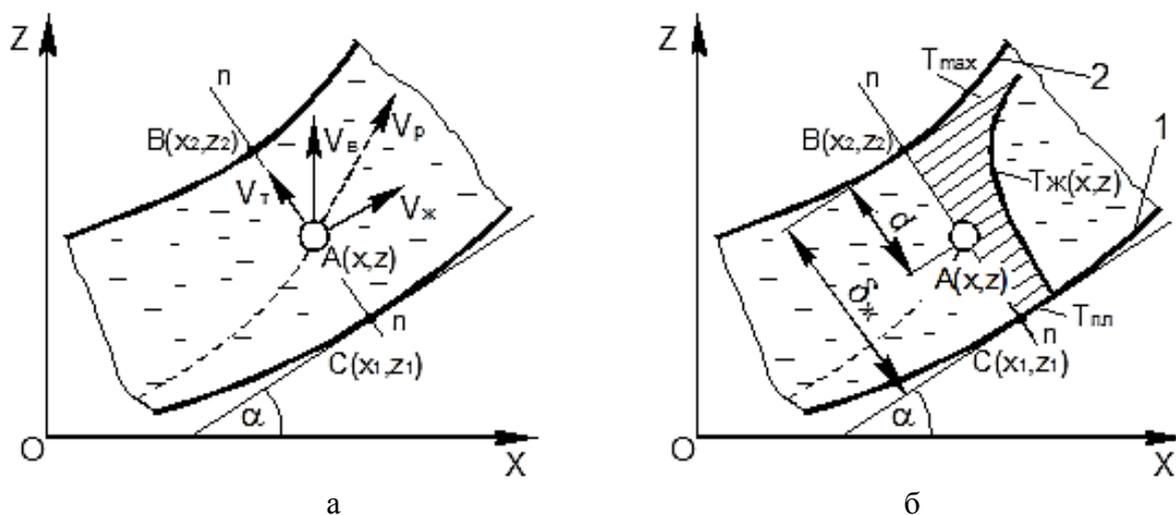


Рис. 2. К определению скоростей пузырька (а) и распределения температуры в металле ванны (б)

Известно, что температура металла в сварочной ванне распределяется неравномерно [8], поэтому газовые пузырьки получают дополнительное движение в сторону увеличения температуры со скоростью [6, 7]:

$$V_T = \frac{r}{2\mu} \frac{d\sigma}{dT} \cdot \frac{dT}{dn}, \quad (4)$$

где  $\frac{d\sigma}{dT}$  – температурный коэффициент поверхностного натяжения, Н/(м·°С);

$\frac{dT}{dn}$  – градиент температуры жидкости в направлении нормали  $n$ , °С/м.

Переносная скорость перемещения газового пузырька в ванне равна скорости движения жидкого металла  $V_{жс}$ , величина которой зависит от параметров режима сварки (наплавки).

Таким образом, результирующий вектор скорости движения газового пузырька в ванне (рис. 2, а) может быть найден по зависимости:

$$\vec{V}_p = \vec{V}_v + \vec{V}_T + \vec{V}_{жс} . \quad (5)$$

Авторы большинства работ, посвященных определению гидродинамических параметров жидкого металла сварочной ванны [6, 7], ограничивались анализом его состояния на передней стенке кратера ванны (рис. 1, от точки D до точки O). В то же время, порообразование происходит в кристаллизующейся задней части ванны (от точки O до точки F), поэтому необходимо рассмотреть движение жидкого металла в этой области ванны.

В работах [6–8] показано, что скорость осевого потока жидкого металла достигает наибольшей величины в самой нижней части кратера ванны (рис. 1, точка O) и по мере перемещения в хвостовую часть ванны замедляется.

Примем в первом приближении, что проекция скорости  $V_{жс}$  на ось  $x$  изменяется по линейному закону от  $V_0$  (в точке O) до  $V_{св}$  (в точке F), тогда

$$V_{жсx} = (V_0 - V_{св}) \cdot \left(1 - \frac{Z}{H}\right) + V_{св} , \quad (6)$$

где  $V_{св}$  – скорость сварки (наплавки), м/с.

Проекция  $V_{жс}$  на ось  $Z$  изменяется по более сложному закону: в точках O и F  $V_{жсz} = 0$ , а в промежутке от  $Z > 0$  до  $Z < H$  – по параболическому закону, при условии равенства проекции вектора переноса количества движения на ось  $Z$  для средней скорости

$V_{жсz}^{cp} = \frac{H}{\delta_{жсв}} V_{св}$  и скорости, меняющейся по закону параболы. Можно показать, что  $V_{жсz}$  будет

определяться по зависимости:

$$V_{жсz} = \frac{6V_{св}}{H \cdot \delta_{жсв}} Z(H - Z) . \quad (7)$$

Примем, что скорость у дна ванны  $V_0$  будет определяться в соответствии с работой [6], сделав поправку на изменение скорости под влиянием присоединяемой массы к жидкой прослойке вследствие плавления электрода

$$V_0 = K_n \cdot \left\{ \frac{[1 + 4A \cdot B \cdot (V_{св} + A \cdot C)]^{\frac{1}{2}} - 1}{2A \cdot B} \right\} , \quad (8)$$

где  $K_n = \frac{1}{1 + \beta \left( \frac{1}{1 + 2\gamma} \right)}$  – поправочный коэффициент;  $\beta = \frac{F_n}{F_{np}}$  – отношение площадей

наплавки и проплавления;  $\gamma = \frac{l_{хв}}{B}$  – отношение длины хвостовой части ванны к ширине шва ;

$$A = \frac{1}{\rho_{ж} \beta_o V_{св} R_o (1 - \sin \alpha_o)} ; \quad B = \frac{3\mu \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_o \right)}{V_{св} (1 - \sin \alpha_o)} ; \quad C = \frac{F_\delta \cdot K \cdot \Delta x}{2\pi R_o} ;$$

$\beta_o$  – коэффициент, корректирующий неравномерность распределения скорости по сечению жидкой прослойки (для параболического распределения скорости равен 0,70);  $F_\delta$  – полное газодинамическое давление дуги на поверхность сварочной ванны, Н;  $K$  – коэффициент сосредоточенности теплового потока дуги, 1/м;  $\Delta x$  – смещение оси электрода (дуги) относительно оси ванны, м.

При определении результирующей скорости (формула 5) необходимо учитывать, что радиус пузырька газа  $r$  будет увеличиваться с течением времени  $t$  в соответствии с выражением [1]:

$$r = \sqrt{r_o^2 + 2D \frac{\Delta c_{жк}}{c_2} \cdot t} , \quad (9)$$

где  $r_o$  – начальный радиус газового пузырька ( $t = 0$ ), м;  $\Delta c_{жк}$  – пересыщение жидкого металла газами, см<sup>3</sup>/100 г;  $c_2$  – количество газа в единице объема, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

Коэффициент диффузии  $D$  зависит от температуры расплава в заданной точке и определяется по зависимости

$$D(T) = D_o \cdot e^{-\frac{U}{RT}} , \quad (10)$$

где  $D_o$  – коэффициент, зависящий от типа материала, см<sup>3</sup>/сек;  $U$  – теплота активации диффузии, кал/(моль·°С);  $R$  – газовая постоянная, кал/(моль·°С);  $T$  – температура, °С.

Плотность жидкости  $\rho_{ж}$ , динамическая вязкость  $\mu$  и поверхностное натяжение жидкости  $\sigma$ , входящие в формулы (3–5), также зависят от температуры и для их определения можно воспользоваться известными параметрическими уравнениями [5, 6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{ж}(T) = a - b(T - T_{пл}); \\ \mu(T) = c + \frac{d}{T^2}; \\ \sigma(T) = \sigma_{пл} - \frac{d\sigma}{dT}(T - T_{пл}) \end{array} \right. , \quad (11)$$

здесь  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $\frac{d\sigma}{dT}$  – коэффициенты, зависящие от типа металла или сплава;  $T_{пл}$ ,

$\sigma_{пл}$  – температура и поверхностное натяжение в точке плавления.

Как уже упоминалось, температура расплава в сварочной ванне распределена неравномерно, особенно по толщине (рис. 2, б). По аналогии с результатами исследования [15] можно вывести зависимость изменения температуры металла по мере удаления по нормали  $n-n$  от поверхности ванны (рис. 2, кривая 2) до фронта кристаллизации (рис. 2, кривая 1) в виде:

$$T_{жк}(x, z) = T_{max} - \Delta T \sqrt{\frac{d}{\delta_{жк}}} , \quad (12)$$

где  $T_{max}$  – температура поверхности ванны в заданном сечении  $n-n$ , °С;  $\Delta T = T_{max} - T_{пл}$  – перепад температуры в жидком слое толщиной  $\delta_{жк}$ , °С;  $d$  – расстояние от поверхности ванны до центра газового пузырька (на рис. 2, б т. А(x, z)).

Подставляя формулы (9–12) в формулы (3–5), можно найти проекции результирующей скорости  $V_p$  на оси координат:

$$\begin{cases} V_{px} = V_{\text{ж}x} + V_{\text{в}x} + V_{\text{т}x} \\ V_{pz} = V_{\text{ж}z} + V_{\text{в}z} + V_{\text{т}z} \end{cases} \quad (13)$$

Учитывая, что  $\frac{dx}{dt} = \dot{V}_{px} = V_{px}$ ,  $\frac{dz}{dt} = \dot{V}_{pz} = V_{pz}$ , получаем систему дифференциальных уравнений, правая часть которых содержит переменные  $x, z, t$ , т. е. это система, в общем, будет совместной.

Решение совместной системы уравнений (13) позволяет определить все характеристики движения газового пузырька в сварочной ванне и оценить вероятность образования пор в шве.

### ВЫВОДЫ

1. Построена модель порообразования в шве при сварке или наплавке. Получены дифференциальные уравнения, позволяющие определить вероятность появления пор в шве.

2. Целесообразно в дальнейшем выполнение исследований по анализу процессов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зусин В. Я. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов наплавкой порошковыми электродами / В. Я. Зусин, В. А. Сиренко – Мариуполь : «Рената», 2011. – 290 с.
2. Роянов В. А. Дефекты и качество при сварке и родственных процессах / В. А. Роянов, В. Я. Зусин, С. С. Самогутин – Мариуполь : «Рената», 2010. – 226 с.
3. Оценка эффективности мер предупреждения пор в швах активных металлов при сварке плавлением различными способами / В. В. Редчиц [и др.] // Сварочное производство. – 1979. – № 10. – С. 12–15.
4. Никифоров Г. Д. Механизм зарождения в сварочной ванне пузырьков газа при сварке активных металлов / Г. Д. Никифоров, В. В. Редчиц // Сварочное производство. – 1977. – № 8. – С. 53–56.
5. Зусин В. Я. Особенности дегазации сварочной ванны при наплавке алюминиевых сплавов порошковой проволокой / В. Я. Зусин, В. А. Сиренко // Вестник Приазов. гос. тех. ун-та.: сб. научн. тр. – Мариуполь, – 1995. – Вып. 1. – С. 189–191.
6. Зусин В. Я. Пути повышения плотности металла при наплавке алюминиевых сплавов порошковыми проволоками / В. Я. Зусин, Л. А. Глозман, В. А. Серенко // Автоматическая сварка. – 1996. – № 8. – С. 39–41.
7. Болдырев Л. М. расчету параметров жидкого металла на дне сварочной ванны при дуговой сварке / Л. М. Болдырев, В. А. Биржев, А. В. Черных // Сварочное производство. – 1992. – № 2. – С. 31–33.
8. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке / Н. Н. Прохоров – М. : Металлургия. – Т.1, 1968. – 695 с.